

# NEUTRO À TERRA

Revista Técnico-Científica

<http://www.neutroaterra.blogspot.com>

*Voltamos à vossa presença com a publicação da 24ª Edição da nossa revista “Neutro à Terra”. Como tem sido habitual em todas as publicações da nossa revista, esperamos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição vá ao encontro das expectativas e do interesse dos nossos leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 24ª publicação em doze anos de existência, em que sem interrupções temos honrado o compromisso que temos com todos os nossos leitores. É com grande satisfação que temos verificado que a nossa revista é atualmente um documento indispensável para alunos de vários cursos de Engenharia Eletrotécnica, mas também para muitos profissionais desta área da engenharia e para muitas empresas do setor eletrotécnico, que sempre manifestaram elevado interesse pelas nossas publicações.*

*José Beleza Carvalho, Professor Doutor*



**Máquinas e Veículos Elétricos**



**Produção, Transporte e Distribuição Energia**



**Instalações Elétricas**



**Telecomunicações**



**Segurança**



**Gestão de Energia e Eficiência Energética**



**Automação, Gestão Técnica e Domótica**

- Editorial	3
- Controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia José António Beleza Carvalho	5
- Motores de propulsão em veículos eléctricos: tipos, características e perspectivas de evolução Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo	19
- Estratégia de Flexibilidade de Veículos Eléctricos para Alívio de Congestionamento em Redes de Distribuição Lucas B. G. Gomes, João Soares, Bruno Canizes, Edison A. C. Aranha Neto	29
- Motor de Tração para Formula Student: A Melhor Opção João Rigor, Teresa Nogueira	35
- Baterias de Iões de Lítio, a chave da Eletrificação Automóvel Henrique Fragoso, Teresa Nogueira	39
- Lighting Consumption Optimization in a Residential House Based on Electricity Price Mahsa Khorram, Teresa Nogueira	45
- Impacto da Iluminação Pública na Natureza André Sousa, Teresa Nogueira	51
- Autores	57

## FICHA TÉCNICA

DIRETOR:	José António Beleza Carvalho, Doutor
SUBDIRETORES:	António Augusto Araújo Gomes, Eng. Roque Filipe Mesquita Brandão, Doutor Sérgio Filipe Carvalho Ramos, Doutor
PROPRIEDADE:	Área de Máquinas e Instalações Eléctricas Departamento de Engenharia Electrotécnica Instituto Superior de Engenharia do Porto
CONTATOS:	jbc@isep.ipp.pt ; aag@isep.ipp.pt

Estimados leitores

Voltamos à vossa presença com a publicação da 24ª Edição da nossa revista “Neutro à Terra”. Como tem sido habitual em todas as publicações da nossa revista, esperamos que a qualidade dos artigos publicados nesta edição vá ao encontro das expectativas e do interesse dos nossos leitores, que nos privilegiam com o seu interesse desde o início das nossas publicações. Esta é a 24ª publicação em doze anos de existência, em que sem interrupções temos honrado o compromisso que temos com todos os nossos leitores. É com grande satisfação que temos verificado que a nossa revista é atualmente um documento indispensável para alunos de vários cursos de Engenharia Eletrotécnica, mas também para muitos profissionais desta área da engenharia e para muitas empresas do setor eletrotécnico, que sempre manifestaram elevado interesse pelas nossas publicações.

Na última edição publicou-se um interessante artigo sobre o funcionamento dos Sistemas Elétricos de Energia e a Rede Nacional de Transporte. Dando seguimento a este assunto, nesta edição publica-se um artigo de natureza mais científica sobre o Controlo dos Sistemas Elétricos de Energia. Neste artigo, apresenta-se os conceitos fundamentais associados às ações de controlo dos sistemas elétricos de energia interligados. Baseia-se na modelização de todos os equipamentos constituintes aos quais se aplicam ações de controlo, com vista a garantir o equilíbrio entre a produção de energia e o consumo, as perdas nas redes de transmissão e a potência especificada para as linhas de interligação, garantindo a estabilidade da frequência e a exploração dos sistemas elétricos de uma forma segura.

Um assunto muito importante e atual, tem a ver com a mobilidade elétrica e, particularmente, com os veículos elétricos. Nesta edição da nossa revista, publica-se um interessante artigo que analisa e compara os sistemas de propulsão baseados em motores síncronos de ímanes permanentes e motores de indução, que têm sido as principais opções dos fabricantes para veículos híbridos e veículos elétricos. De modo não exaustivo, o autor analisa o desempenho destes motores e compara com os tradicionais motores de combustão interna. O artigo faz ainda referência às principais tecnologias emergentes, como os motores com polos salientes no estator e no rotor, os motores sem ímanes permanentes e os motores *Vernier*.

Nesta edição da revista, também no âmbito das máquinas elétricas e dos veículos elétricos, apresenta-se um interessante artigo sobre o dimensionamento de um veículo elétrico para competição, o *Formula Student*. Este veículo enquadra-se num projeto que é gerido e realizado integralmente por alunos de engenharia com o propósito de complementar a formação académica, permitindo assim profissionais bem preparados para o ramo da indústria automóvel. Ainda neste âmbito, publica-se também nesta edição um artigo sobre as baterias de íões Lítio. Estas baterias são um dos sistemas de armazenamento químico de energia elétrica mais relevantes da atualidade, com aplicação nos mais diversos dispositivos elétricos e eletrónicos e também nos veículos elétricos e híbridos. Neste artigo são apresentadas e comparadas 3 tecnologias de baterias de íões de lítio utilizadas na indústria automóvel.

O crescente interesse pela nossa revista por parte de leitores de países estrangeiros leva-nos a publicar com alguma regularidade artigos em língua Inglesa. Nesta edição publica-se um artigo intitulado “*Lighting Consumption Optimization in a Residential House Based on Electricity Price*”. Neste artigo, apresenta-se uma metodologia que, através da formulação de um problema de otimização linear, permite minimizar o consumo de energia elétrica em iluminação em habitações residenciais, baseando-se nos preços da energia elétrica e tirando vantagens da produção fotovoltaica.

Nesta edição da nossa revista merecem ainda destaque alguns artigos de elevado valor técnico e científico, como “O Impacto da Iluminação Pública na Natureza”, onde é analisado o impacto da iluminação pública na saúde humana e em alguns animais, devido a distúrbios no respetivo ciclo biológico destes seres vivos. Outro interessante artigo científico sobre “Estratégia de Flexibilidade de Veículos Elétricos para Alívio de Congestionamento em Redes de Distribuição”, onde é apresentada uma estratégia de carregamento de veículos elétricos, que visa aproveitar de forma inteligente os longos tempos que estes veículos estão estacionados nos postos de carregamento.

Estando certo que nesta edição da revista “Neutro à Terra” apresenta-se novamente interessantes artigos técnicos e científicos para todos os profissionais do setor eletrotécnico, satisfazendo assim as expectativas dos nossos leitores, apresento os meus cordiais cumprimentos e votos de um Excelente Ano de 2020.

Porto, 31 dezembro de 2019

José António Beleza Carvalho



Blog:

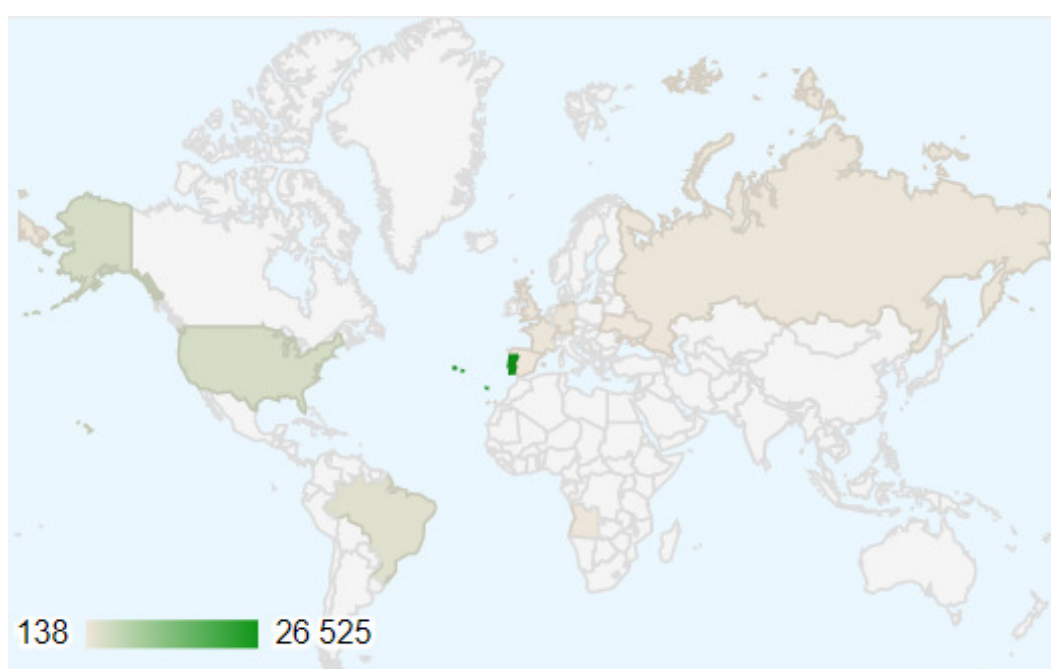
[www.neutroaterra.blogspot.com](http://www.neutroaterra.blogspot.com)

Histórico de visualizações

**35 589**

Entrada	Visualizações de páginas
Portugal	26525
Estados Unidos	3059
Brasil	2019
Alemanha	570
Rússia	481
França	446
Angola	244
Reino Unido	215
Ucrânia	194
Espanha	138

**Público**



## CONTROLO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

### 1 Introdução

Um dos principais objetivos do controlo de um Sistema Elétrico de Energia (SEE) interligado com sistemas vizinhos são os de escalonar as unidades de produção, estabelecer um despacho ótimo e garantir um eficaz equilíbrio entre a produção e o consumo, considerando as perdas na rede e os valores contratualizados para as interligações. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação.

De facto, no passado, o controlo dos geradores foi o primeiro problema existente no controlo das redes elétricas. Os métodos desenvolvidos para controlo automático dos geradores, assim como o controlo da energia que transita nas interligações, têm atualmente um papel fundamental nos modernos centros de controlo dos SEE.

Um gerador acionado por uma turbina pode ser representado como uma grande massa rotativa, com dois binários que atuam em oposição. Como se pode ver na figura 1,  $T_{mec}$ , o binário mecânico, atua de modo a aumentar a velocidade angular, enquanto  $T_{el}$ , o binário eletromagnético elétrico, ou resistente, atua de modo a reduzir essa mesma velocidade.

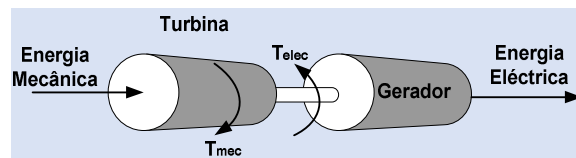


Figura 1: Binário mecânico e elétrico num grupo de produção

Quando o binário mecânico iguala em magnitude o binário eletromagnético, a velocidade angular  $\omega$  será constante. Se a carga elétrica aumentar de modo que  $T_{el}$  seja maior que  $T_{mec}$ , todo o sistema vai reduzir a sua velocidade. Como seria desastroso para a estabilidade da frequência deixar o sistema diminuir a sua velocidade, alguma coisa deve ser feita de modo a aumentar o binário mecânico  $T_{mec}$  para que o equilíbrio seja restabelecido, isto é, voltar a colocar o sistema a girar à velocidade nominal e igualar os binários, para que a velocidade volte a ser estabilizada e se mantenha constante.

Este processo deve ser efetuado sistematicamente devido às constantes variações da carga. Atendendo ao elevado número de geradores existentes num SEE, existem soluções que permitem distribuir as variações de carga por todos eles. Para isso, os geradores são equipados com sofisticados sistemas de controlo. Um controlador em cada unidade mantém constante a velocidade, enquanto o controlo

suplementar, normalmente efetuado por teleregulação a partir de um centro de controlo remoto, atua para distribuir a produção entre todos os geradores em serviço.

A figura 2 representa esquematicamente o princípio em que se baseia atualmente o controlo dos SEE.

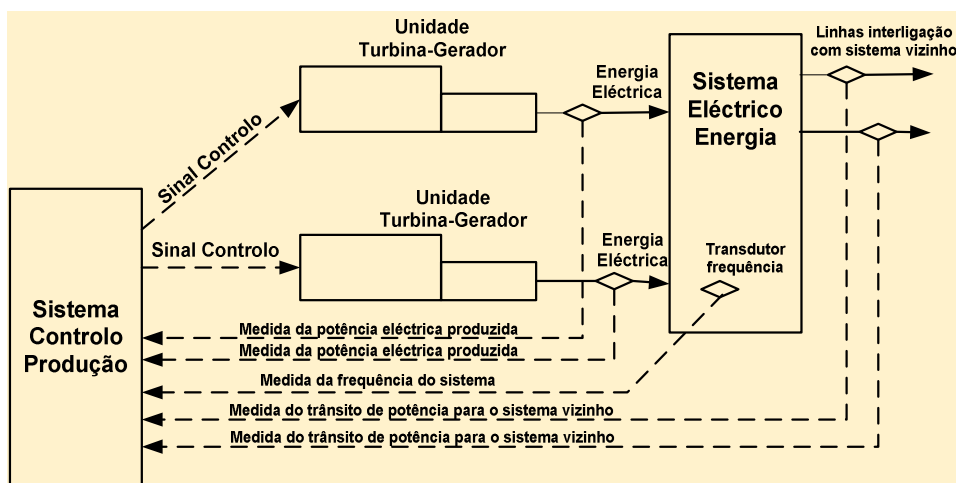


Figura 2: Controlo da produção em sistemas elétricos de energia interligados

## 2 Modelização dos geradores

Na teoria dos sistemas de controlo, é fundamental modelizar todos os equipamentos intervenientes. No caso dos SEE, para que as ações de controlo sejam efetuadas com sucesso, é de extrema importância conhecer com exatidão o modelo dos equipamentos sujeitos a ações de controlo com vista ao funcionamento estável e seguro dos SEE. Neste âmbito, inicialmente é importante definir-se alguns termos.

$\omega$	Velocidade angular (rad/seg)
$\alpha$	Aceleração angular
$\delta$	Ângulo de fase da máquina
$T_a$	Binário de aceleração da máquina
$T_{mec}$	Binário mecânico exercido na máquina pela turbina
$T_{elec}$	Binário elétrico exercido na máquina pelo gerador
$P_a$	Potência de aceleração
$P_{mec}$	Potência mecânica (entrada)
$P_{elec}$	Potência elétrica (saída)
$J$	Momento de inércia da máquina
$M$	Momento angular da máquina

Todas as quantidades, exceto o ângulo de fase, estão em “pu” do valor de base da máquina, ou, no caso de  $\omega$ , na frequência nominal do sistema.

No desenvolvimento a seguir, interessa considerar os desvios das grandezas do sistema em regime permanente. Os valores nominais ou de regime permanente têm o sobrescrito “0”.

Os desvios vão ser designados por  $\Delta$ .

Seguidamente, apresentam-se algumas relações fundamentais entre estas grandezas:

$$J \cdot \alpha = T_a \quad (1)$$

$$M = J \cdot \omega \quad (2)$$

$$P_a = \omega \cdot T_a = \omega(J\alpha) = M \cdot \alpha \quad (3)$$

Inicialmente considera-se apenas uma máquina rotativa.

Assume-se que inicialmente a máquina tem uma velocidade constante  $\omega_0$  e ângulo de fase  $\delta_0$ . Devido a efeitos de natureza elétrica, ou perturbações de natureza mecânica, a máquina vai estar sujeita a diferenças nos binários elétrico e mecânico, implicando uma aceleração ou desaceleração. O que vai interessar são os desvios da velocidade  $\Delta\omega$  e os desvios de fase  $\Delta\delta$  relativamente aos seus valores nominais. O desvio do ângulo de fase  $\Delta\delta$  é igual à diferença do ângulo de fase entre a máquina sujeita a uma aceleração  $\alpha$  e o eixo de referência da velocidade  $\omega_0$ . Se a velocidade da máquina em aceleração for  $\omega = \omega_0 + \alpha t$ , então:

$$\Delta\delta = \underbrace{\int (\omega_0 + \alpha t) dt}_{\text{ângulo de fase absoluto}} - \underbrace{\int \omega_0 dt}_{\text{ângulo de fase referência}} = \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (4)$$

O desvio da velocidade nominal,  $\Delta\omega$ , pode ser apresentado como:

$$\Delta\omega = \alpha t = \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \quad (5)$$

A relação entre o desvio do ângulo de fase, o desvio de velocidade e o binário de aceleração é:

$$T_a = J\alpha = J \frac{d}{dt}(\Delta\omega) = J \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\delta) \quad (6)$$

A seguir vai-se relacionar os desvios das potências elétricas e mecânicas com os desvios da velocidade de rotação e binário mecânico.

A relação entre a potência de aceleração e a potência elétrica e mecânica é:

$$P_a = P_{mec} - P_{elec} \quad (7)$$

Que pode ser escrita como a soma do seu valor em regime permanente com o valor do desvio:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a \quad (8)$$

Onde:

$$P_{a0} = P_{mec0} - P_{elec0}$$

$$\Delta P_a = \Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}$$

Então

$$P_a = (P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) \quad (9)$$

De igual modo para os binários:

$$T_a = (T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (10)$$

Usando a equação (3) pode-se obter:

$$P_a = P_{a0} + \Delta P_a = (\omega_0 + \Delta\omega)(T_{a0} + \Delta T_a)$$

Substituindo em (8) e (10), obtém-se:

$$(P_{mec0} - P_{elec0}) + (\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec}) =$$

$$= (\omega_0 + \Delta\omega)[(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec})]$$

Assumindo que os valores permanentes podem ser fatorizados desde que:

$$P_{mec0} = P_{elec0}$$

$$T_{mec0} = T_{elec0}$$

E assumindo também que os termos de segunda ordem que envolvem produtos de  $\Delta\omega$  com  $T_{mec}$  e que  $\Delta T_{elec}$  podem ser desprezados, então:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) \quad (11)$$

Como se pode ver na equação (6), o binário de aceleração está relacionado com o desvio de velocidade da seguinte forma:

$$(T_{mec0} - T_{elec0}) + (\Delta T_{mec} - \Delta T_{elec}) = J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (12)$$

Então como  $T_{mec0} = T_{elec0}$ , pode-se combinar as equações (11) e (12) para encontrar:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = \omega_0 J \frac{d}{dt} (\Delta\omega) = M \frac{d}{dt} (\Delta\omega) \quad (13)$$

Aplicando a Transformada de Laplace obtém-se para a equação:

$$\Delta P_{mec} - \Delta P_{elec} = M s \Delta\omega \quad (14)$$

Esta equação e o respetivo sistema de controlo realimentado está representada no diagrama de blocos da figura 3.

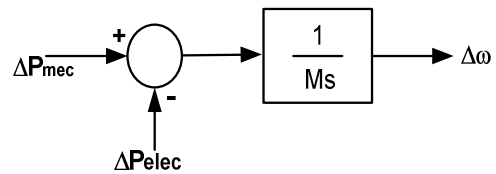


Figura 3: relação entre a potência mecânica e a potência elétrica e a variação de velocidade

As unidades de M são em Watt por radiano por segundo. Vai usar-se sempre a potência em “pu” face à velocidade em “pu” por segundo (“pu” nos valores de base da máquina).

### 3 Modelização da carga alimentada pelos geradores

As cargas ligadas a um sistema elétrico consistem num conjunto de equipamentos elétricos, alguns puramente resistivos, outros são motores com relações potência-frequência variáveis e, outros, apresentam as mais diversas características. Como os motores são a maioria das cargas de um SEE, há necessidade de modelizar o efeito das variações da frequência da rede nessas cargas. A relação entre as variações de carga com origem em desvios de frequência é obtida por:

$$\Delta P_{L(freq)} = D \Delta\omega$$

$$D = \frac{\Delta P_{L(freq)}}{\Delta\omega}$$

onde D representa o desvio da carga em percentagem, dividido por o desvio da frequência também em percentagem.

Por exemplo, se a carga variar 2% quando se verifica um desvio de 1% na frequência, D seria igual a 2. Contudo o valor de D usado para resolver respostas dinâmicas do sistema deve ser alterado se o valor de base MVA for diferente do valor nominal da carga. Por exemplo, D era referido para uma carga nominal de 1200 MVA e o problema dinâmico estava referido a uma base de 1000 MVA. Notar que  $D=2$  diz que a carga varia em 2 pu para um desvio de 1 pu verificado na frequência. Isto é, a carga pode variar em  $2 \times 1200$  ou 2400 MVA para um desvio de 1% na frequência.

Quando expresso numa base de 1000 MVA, D fica igual a:

$$D_{1000/MVA} = 2 * \left( \frac{1200}{1000} \right) = 2,4$$

O desvio de  $P_{elec}$  na figura 3, equação (15) é:

$$\Delta P_{elec} = \underbrace{\Delta P_L}_{\text{desvio insensível à frequência}} + \underbrace{D \cdot \Delta \omega}_{\text{desvio sensível à frequência}}$$

Incluindo esta abordagem no diagrama de blocos da figura 3 resulta num novo diagrama de blocos que se apresenta na figura 4.

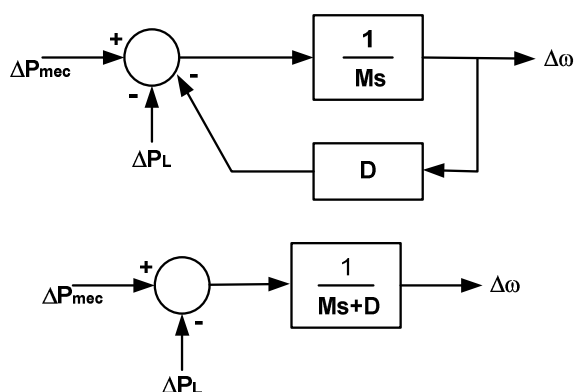


Figura 4: diagrama de blocos das massas girantes e da carga na forma como é visto pela máquina primária

Quando dois ou mais geradores estão ligados em paralelo num sistema, deve-se ter em consideração as diferenças angulares de fase ao longo da rede e analisar os respetivos desvios de frequência.

No entanto, para facilitar análise do funcionamento do controlador, assume-se que a frequência é igual em toda a rede. Assim, pode-se agrupar as massas rotativas das turbinas dos geradores num sistema equivalente, que é obtido pela soma das potências de saída das unidades individuais.

Isto é apresentado na figura 5, onde todas as unidades são agrupadas numa única massa rotativa equivalente,  $M_{equiv}$ .

De igual modo, todas as cargas individuais do sistema são agrupadas numa carga equivalente com coeficiente de amortecimento  $D_{equiv}$ .

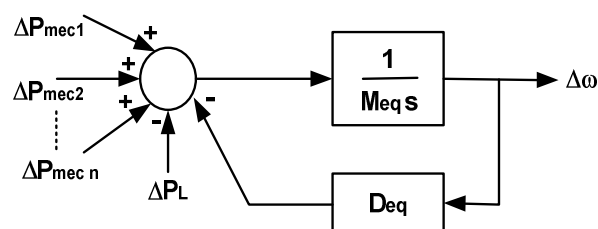


Figura 5: sistema equivalente a vários grupos geradores acionados por múltiplas turbinas

#### 4 Modelização das turbinas

O sistema que aciona o gerador pode ser uma turbina a vapor ou hidráulica. Os modelos para estes sistemas têm que ter em consideração o fornecimento de vapor e as características de controlo do sistema da caldeira, no caso da turbina a vapor, ou as características do distribuidor das turbinas hidráulicas. Vai-se considerar os sistemas mais simples.

O modelo destes sistemas mais simples, apresentado na figura 6, relaciona a posição da válvula que controla o fluxo de admissão de combustível, água, ou vapor, com a potência de saída da máquina, onde TCH é a constante de tempo, “tempo de carga” e  $\Delta P_{valv}$  é igual ao desvio da válvula do valor nominal em p.u..



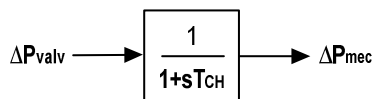


Figura 6: modelo das turbinas ou máquina primária

O modelo do sistema máquina primária – gerador – carga para um grupo gerador, pode ser construído juntando as figuras 4 e 6, como se apresenta na figura 7.

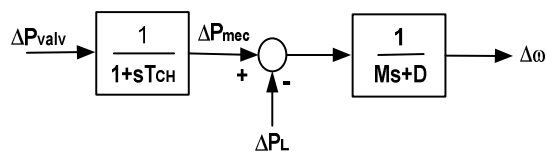


Figura 7: modelo da máquina primária, gerador e carga

## 5 Modelização do sistema de controlo

Supor uma unidade de produção a trabalhar com valor constante da potência mecânica fornecida pela turbina. Qualquer variação na carga resultará numa variação da velocidade, o que seria suficiente para que a carga sensível à frequência compensasse exatamente essa variação na carga.

Esta condição originará que a frequência do sistema possa desviar-se para além dos limites que estava sujeita. Este problema pode ser ultrapassado adicionando um mecanismo controlador que “mede” a velocidade da máquina e ajusta a válvula de admissão de fluido na turbina de modo a alterar a potência mecânica fornecida, compensando as variações da carga e restaurando a frequência para os valores nominais.

No passado usava-se um mecanismo com esferas em extremidades de hastes (regulador centrífugo de ação direta) que giravam e “sentiam” a velocidade da máquina e forneciam um movimento mecânico de resposta às variações da velocidade (reguladores centrífugos).

Os controladores modernos usam meios eletrónicos para medir desvios na velocidade e normalmente usam combinações de sistemas eletrónicos, mecânicos e meios hidráulicos para regular a posição da válvula de admissão.

O controlador mais simples “ISÓCRONO”, ajusta a posição da válvula para um valor que mantém a frequência sempre no seu valor nominal. Este sistema só é eficaz se controlar uma máquina isoladamente, caso contrário, os controladores vão “lutar” entre si. Por outro lado, os controladores não isócronos originam um desvio de frequência diferente de zero. Para forçar o erro da frequência para zero, é necessário efetuar uma ação de reposicionamento. Esta ação é conseguida integrando o erro de frequência (ou velocidade) que é a diferença entre a velocidade atual e a desejada ou de referência (nominal). Este mecanismo está representado na figura 8.

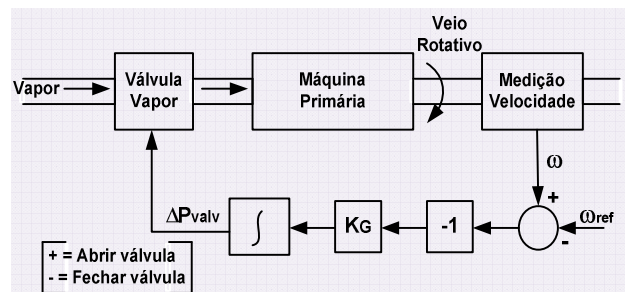


Figura 8: modelo do controlador isócrono

A saída do sistema de medição da velocidade,  $\omega$ , é comparado com a referência  $\omega_{ref}$  para produzir o sinal de erro  $\Delta\omega$ .

Este erro  $\Delta\omega$  é negado e amplificado com um ganho KG e integrado para produzir um sinal de controlo,  $\Delta P_{válv}$ , que faz com que a válvula de admissão abra ( $\Delta P_{posição\ válvula}$ ) quando  $\Delta\omega$  é negativo. Se, por exemplo, a máquina está a girar à velocidade nominal e a carga eléctrica aumenta,  $\omega$  vai baixar para valores inferiores a  $\omega_{ref}$  e  $\Delta\omega$  vai ser negativo.

A ação do amplificador e integrador vai ser a de abrir a válvula de admissão, fazendo com que a turbina aumente a potência mecânica, aumentando a velocidade  $\omega$  e, assim, aumentando a  $P_{elec}$  do gerador.

Quando  $\omega$  for igual a  $\omega_{ref}$  a válvula fica numa nova posição (mais aberta) permitindo ao grupo turbina-gerador produzir o suficiente para fazer face ao aumento da carga.

O controlador “isócrono” (velocidade constante) da figura 8 não pode ser utilizado se dois ou mais geradores estiverem eletricamente ligados ao mesmo sistema, visto que ambos teriam que ter a mesma velocidade ou “lutariam” para tentar trazer a frequência do sistema para o seu valor nominal.

Para ser possível ter dois ou mais geradores ligados em paralelo, os controladores estão equipados com uma malha de realimentação que faz com que o erro de velocidade seja anulado para os diferentes valores de produção do gerador. Isto pode ser realizado adicionando uma malha de realimentação à volta do integrador, como se apresenta na figura 9.

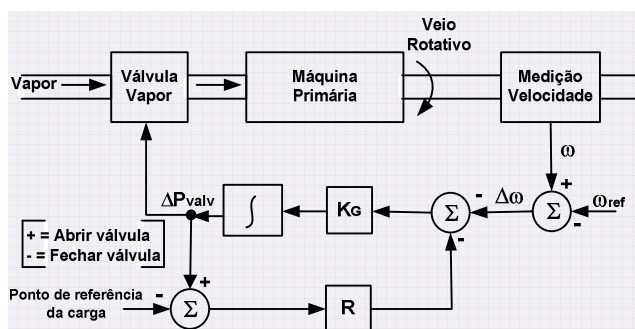


Figura 9: modelo do controlador com realimentação da queda de velocidade

Notar que se inseriu uma nova entrada, chamada “ponto de referência da carga”, que se abordará mais à frente. O diagrama de blocos deste controlador é mostrado na figura 10, onde se pode verificar a existência de um andar ganho de  $1/R$  e uma constante de tempo  $T_G$ .

O resultado de adicionar a malha de retorno com ganho  $R$  é uma característica como se apresenta na figura 11.

O valor de  $R$  determina o declive da característica. Isto é,  $R$  determina as alterações na saída da unidade para um determinado desvio na frequência. Prática comum é regular  $R$  em cada unidade de modo que a alteração de 0 a 100% da saída resulte na mesma variação da frequência em cada unidade de produção.

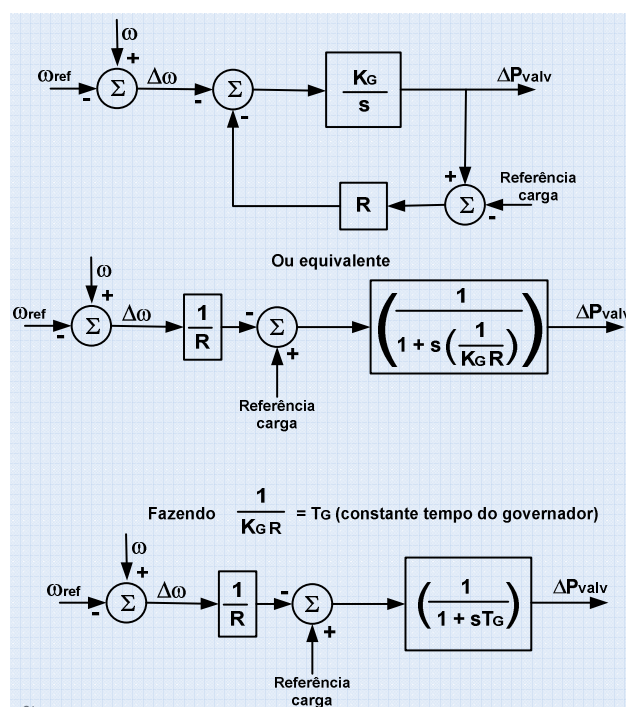


Figura 10: diagrama de blocos do modelo do controlador com queda de velocidade

Como resultado, alterações na carga elétrica do sistema serão compensadas por alterações na saída das unidades produtoras, proporcionais à potência nominal de cada uma delas.

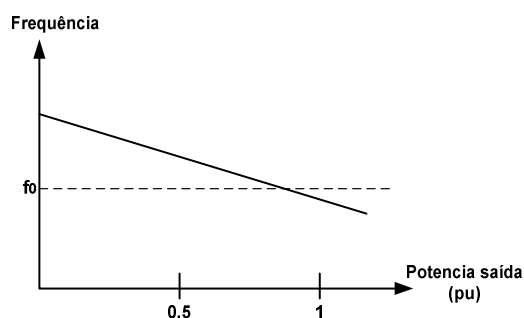


Figura 11: característica de velocidade dos grupos geradores

Se dois geradores com as respectivas características de velocidade apresentadas na figura 11 forem ligados a uma rede, a frequência será sempre constante e igual nos dois, pelo que eles irão partilhar a carga entre si. Isto é apresentado na figura 12, que apresenta duas unidades com características diferentes partilhando a carga entre si.

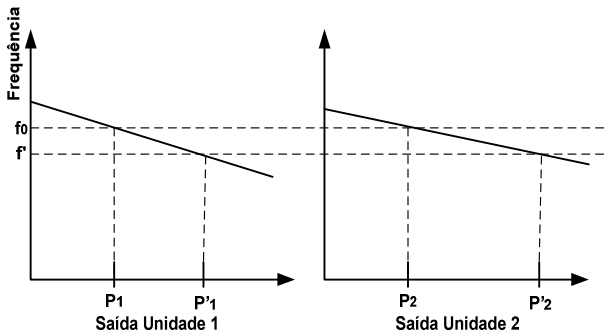


Figura 12: Distribuição da carga por dois grupos geradores

Como apresentado na figura 12, as duas unidades estão inicialmente à frequência nominal de valor  $f_0$ .

Quando a carga aumenta  $\Delta PL$ , a tendência é que cada unidade baixe a velocidade. Os controladores vão atuar aumentando a produção da unidade até encontrar uma nova frequência comum  $f'$ .

O valor de carga assumido por cada unidade é proporcional ao declive da sua característica.

A unidade 1 aumenta a sua produção de  $P_1$  para  $P'_1$ , a unidade 2 aumenta a produção de  $P_2$  para  $P'_2$ , de modo que a produção aumente  $P'_1 - P_1 + P'_2 - P_2$ , igual a  $\Delta PL$ .

Notar que a frequência atual depende também da característica de regulação de cada unidade de produção.

A figura 9 apresenta uma entrada chamada “ponto de referência da carga”. Alterando este ponto de referência da carga, a característica do controlador pode ser ajustada de forma a obter a frequência de referência para qualquer valor de produção. Isto é apresentado na figura 13.

O ponto fundamental do controlo de uma unidade de produção é o ponto de referencia da carga. Ajustando este ponto de regulação em cada unidade, o despacho desejado para cada unidade pode ser mantido enquanto a frequência do sistema se mantiver próxima do valor desejado.

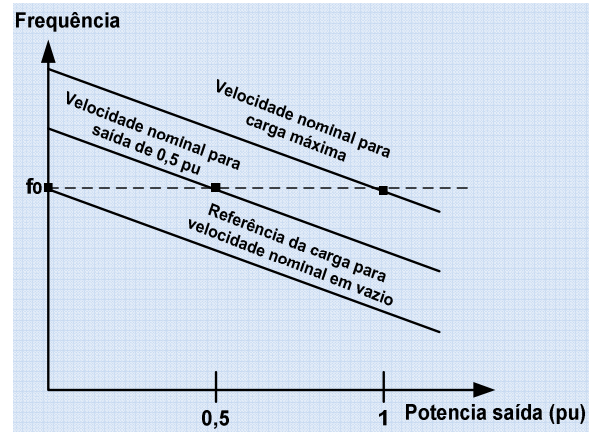


Figura 13: parâmetros para regulação da velocidade

Em regime permanente uma alteração em  $\Delta P_{\text{válvula}}$  de 1 pu necessita de uma variação de  $R$  pu no valor da frequência. Por exemplo, uma regulação de 3% de uma unidade indica que a uma alteração na válvula de 100% (1 pu ou alteração de 100% na saída da unidade) corresponde uma alteração de 3% na frequência.

Então,  $R$  é igual ao desvio da frequência (pu) dividida pelo desvio da saída (pu). Isto é:

$$R = \frac{\Delta \omega}{\Delta P} \text{ [pu]}$$

Assim, pode-se construir um diagrama de blocos da unidade de produção e do respetivo controlador da máquina primária/carga como apresentado na figura 14.

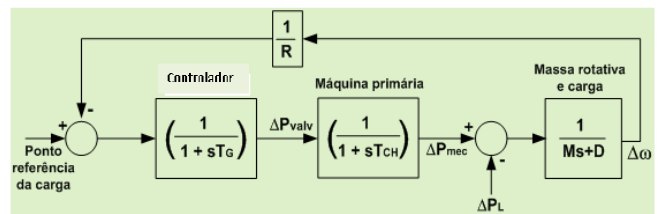


Figura 14: Diagrama de blocos, controlador, turbina e massas girantes

Supondo que o gerador sofre um aumento de carga  $\Delta PL(s) = \Delta PL/s$ , a função de transferência que relaciona a alteração da carga  $\Delta PL$ , com a variação da frequência  $\Delta \omega$  é:

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_L(s) \left[ \frac{\frac{-1}{Ms + D}}{1 + \frac{1}{R} \left( \frac{1}{1 + sT_G} \right) \left( \frac{1}{1 + sT_{CH}} \right) \left( \frac{1}{Ms + D} \right)} \right]$$

O valor de  $\Delta\omega(s)$  em regime permanente pode ser encontrado por:

$$\Delta\omega_{regime\ permanente} = \lim_{s \rightarrow 0} [s\Delta\omega(s)] = \frac{-\Delta P_L \left(\frac{1}{D}\right)}{1 + \left(\frac{1}{R}\right)\left(\frac{1}{D}\right)} = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R} + D}$$

Notar que se  $D=0$  o desvio da velocidade seria simplesmente  $\Delta\omega=-R\Delta PL$ .

Se vários geradores (cada com seu controlador e máquina primária) estiverem ligados à rede, o desvio da frequência será:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_L}{\frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} + D}$$

## 6. Modelização das linhas de interligação

O trânsito de potência numa linha pode ser equacionado de uma forma simples usando o modelo DC. A equação seguinte permite obter o fluxo de potência numa linha de interligação em regime permanente.

$$P_{fluxo\ linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2)$$

Para efeito de análise, pode-se ajustar a equação de forma que esta traduza os desvios do valor da potência especificada (ou de referência), em função dos desvios dos respectivos ângulos de fase.

$$\begin{aligned} P_{f.linha} + \Delta P_{f.linha} &= \frac{1}{X_{linha}} [(\theta_1 + \Delta\theta_1) - (\theta_2 + \Delta\theta_2)] = \\ &= \frac{1}{X_{linha}} (\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{X_{linha}} (\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \end{aligned}$$

Assim, a variação da potência numa linha de interligação pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{1}{X_{linha}} (\Delta \theta_1 - \Delta \theta_2)$$

onde  $\Delta\theta_1$  e  $\Delta\theta_2$  são equivalentes a  $\Delta\delta_1$  e  $\Delta\delta_2$  definidos e apresentados na equação 5. Então, usando a relação apresentada na equação 5, obtém-se:

$$\Delta P_{f.linha} = \frac{T}{S}(\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)$$

Onde:

$$T=377 \times 1/X_{\text{linha}} \text{ (para 60Hz).}$$

$\Delta\theta$  tem que estar expresso em radianos para  $\Delta P_{\text{linha}}$  estar em “pu” de MW, mas  $\Delta\omega$  está em pu do desvio de velocidade. Por isso, tem-se que multiplicar  $\Delta\omega$  por 377 rad/seg (frequência de base em rad/seg a 60Hz,  $2\pi f$ ). T é o coeficiente de rigidez da linha, ou “stiffness”.

Considere-se agora um sistema interligado dividido em duas áreas, cada uma com seus geradores. As áreas estão interligadas por uma linha comum. O fluxo de potência na linha vai manifestar-se como uma carga positiva para uma área e carga igual, mas negativa para a outra área, ou vice-versa dependendo do sentido do fluxo de energia. O sentido do fluxo é determinada pelo ângulo de fase entre as áreas, que é determinado pelos desvios relativos da “velocidade elétrica” em ambas as áreas. Um diagrama de blocos representando esta ligação é apresentado na figura 15.

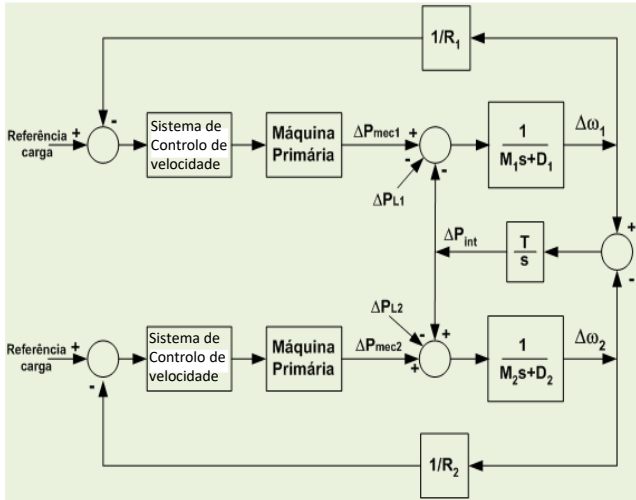


Figura 15: Diagrama de blocos de duas áreas interligadas

Notar que o fluxo de potência na linha foi definido ir da área 1 para a 2, então, o fluxo aparece como carga para a área 1 e como produção (carga negativa) para a área 2.

Assumindo que as potências mecânicas são constantes, as massas rotativas e a linha de interligação apresentam características oscilatórias amortecidas, conhecidas como oscilações de sincronização.

É muito importante analisar o desvio da frequência em regime permanente, os desvios do fluxo de potência nas linhas de interligação e a produção dos geradores depois de se manifestar variações na carga de qualquer uma das áreas. Supor uma variação na carga da área 1 de  $\Delta P_{L1}$ . Em regime permanente, depois das oscilações de sincronização terem sido amortecidas, a frequência será constante e de igual valor nas duas áreas. Então:

$$\Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \Delta \omega \quad e \quad \frac{d(\Delta \omega_1)}{dt} = \frac{d(\Delta \omega_2)}{dt} = 0$$

$$\Delta P_{mec1} - \Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta \omega D_1 \quad (15)$$

$$\Delta P_{mec2} + \Delta P_{linha} = \Delta \omega D_2$$

Sendo:

$$\Delta P_{mec1} = -\frac{\Delta \omega}{R_1}$$

$$\Delta P_{mec2} = -\frac{\Delta \omega}{R_2}$$

Fazendo as substituições adequadas obtém-se:

$$-\Delta P_{linha} - \Delta P_{L1} = \Delta \omega \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right)$$

$$\Delta P_{linha} = \Delta \omega \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Ou, finalmente obtém-se a equação:

$$\Delta \omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2}$$

A partir da qual pode-se encontrar o desvio do fluxo de potência na linha de interligação:

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (16)$$

Notar que as condições consideradas nas equações anteriores são para as novas condições em regime permanente, após as variações verificadas na carga. O novo fluxo de energia na linha de interligação é determinado pelo desvio médio da carga e a produção de cada área. Não é necessário conhecer a rigidez da linha T para determinar o novo trânsito na linha, embora a rigidez determine a variação do ângulo de fase resultante do novo trânsito de potência na linha.

Caso seja pretendido analisar dinamicamente o comportamento nas 2 áreas, verificava-se que um desvio na carga resulta num erro de frequência. Isto é apresentado na figura 16, que mostra a resposta em frequência do sistema para um desvio da carga. Notar que a figura 16 apresenta apenas valores médios, omitindo qualquer oscilação de elevada frequência.

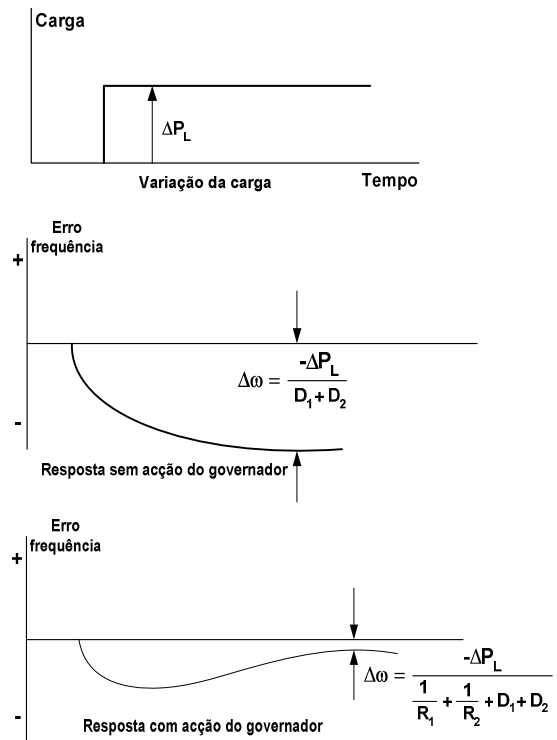


Figura 16: Resposta em frequência para uma variação de carga



## 7. Controlo automático da produção

Controlo Automático da Produção, ou *Automatic Generation Control* (AGC) é o nome atribuído a um sistema de controlo que tem três objetivos fundamentais

1. Manter a frequência do sistema dentro dos limites estabelecidos;
2. Manter os intercâmbios de potência entre áreas dentro dos valores estabelecidos;
3. Manter a produção de cada grupo no valor mais económico.

### 7.1 Controlo Suplementar

Para compreender cada um dos objetivos apresentados, vai assumir-se inicialmente que se tem apenas uma única unidade de produção a alimentar uma carga de um sistema isolado.

Como na figura 5, alterações na carga produzirão alterações na frequência, com uma amplitude que depende da característica de regulação do controlador e da sensibilidade das cargas à variação da frequência. Desde que ocorra uma alteração na carga, um controlo suplementar deve atuar para restaurar a frequência para o valor nominal.

Isto pode ser implementado adicionando um controlo de *reset* no controlador, como apresentado na figura 17.

A ação de *reset* do controlo suplementar vai forçar o erro de frequência para zero, ajustando o valor de referência da velocidade. Por exemplo, o erro ilustrado na figura 16 seria forçado para zero, ou anulado.

### 7.2 Controlo da potência nas linhas de interligação

Quando duas áreas interligam os seus sistemas fazem-no por várias razões. A primeira é permitir comprar ou vender energia ao sistema vizinho que permita custos de operação mais rentáveis.

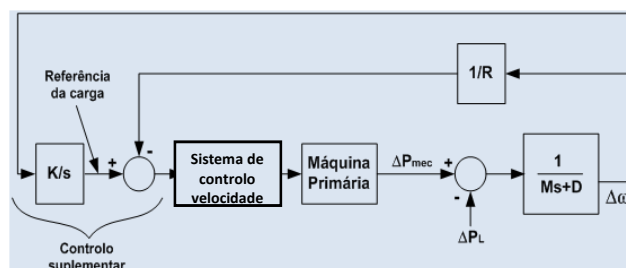


Figura 17: Controlo suplementar adicionado à produção dos geradores

Depois, mesmo que não haja fluxo de potência na linha, se um sistema sofrer uma perda repentina de uma unidade de produção, as unidades dos sistemas interligados irão sentir desvios na frequência, e podem ajudar a restaurar esse valor para o nominal.

As interligações apresentam um problema de controlo interessante no que diz respeito à distribuição da carga pelos geradores. A situação hipotética da figura 18 será usada para ilustrar o problema. Supor que os dois sistemas da figura têm características de produção e carga iguais ( $R_1=R_2$  e  $D_1=D_2$ ).

Assumir que o sistema 1 envia 100 MW para o sistema 2 sob um acordo feito entre os operadores dos dois sistemas. Agora, supor que o sistema 2 sofre um repentino aumento de carga de 30 MW.

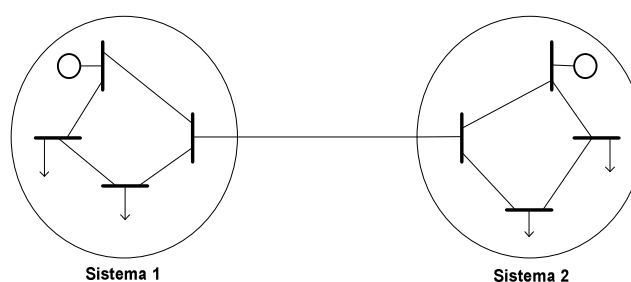


Figura 18: Sistema de duas áreas interligadas

Como as unidades têm características iguais, ambas vão sentir um aumento de 15 MW na carga, e a linha de interligação vai sofrer um aumento no trânsito de energia de 100 MW para 115 MW. Ou seja, o aumento de 30 MW na carga do sistema 2 vai ser compensado com um aumento na produção do sistema 2 de 15 MW mais um aumento do trânsito na linha de 15 MW para o sistema 2.

Isto seria bom, só que o sistema 1 tinha contratado vender apenas 100 MW e não 115 MW, e os seus custos de produção aumentaram sem que ninguém pague o extra produzido. Assim, torna-se necessário um sistema de controlo que reconheça que os 30 MW de aumento de carga ocorreram no sistema 2 e, por isso, aumente a produção do sistema 2 em 30 MW, restabelecendo a frequência do sistema no seu valor nominal. O controlo do sistema 1 também alteraria a produção do sistema 1 para a que tinha antes de se verificar o aumento repentino de 30 MW na carga do sistema 2.

Tal sistema de controlo deve usar dois circuitos de informação:

- A frequência do sistema;
- O fluxo de potência na linha de interligação.

Este esquema de controlo deveria, se necessário, reconhecer o seguinte:

1. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema aumentar, um aumento de carga ocorreu no sistema vizinho;
2. Se a frequência baixar e se o trânsito de potência a sair do sistema diminuir, um aumento de carga ocorreu no próprio sistema.

Isto também pode ser estendido para casos em que a frequência aumente.

Considerar o seguinte:

$P_{int}$  = Intercâmbio de potência na linha de interligação  
 (“+” para fluxo a sair da área, “-” para fluxo a entrar)

$P_{intcontratado}$  = Intercâmbio contratado.

$$\Delta P_{int} = P_{int} - P_{intcontr}$$

As ações de controlo podem ser resumidas na tabela 1.

Tabela 1: Ações de controlo

$\Delta\omega$	$\Delta P_{int}$		Alteração carga	Ação de controlo resultante
-	-		$\Delta PL_1$ + $\Delta PL_2$ 0	Aumento Pger sistema 1
+	+		$\Delta PL_1$ - $\Delta PL_2$ 0	Diminuição Pger sistema 1
-	+		$\Delta PL_1$ 0 $\Delta PL_2$ +	Aumento Pger sistema 2
+	-		$\Delta PL_1$ 0 $\Delta PL_2$ -	Diminuição Pger sistema 2

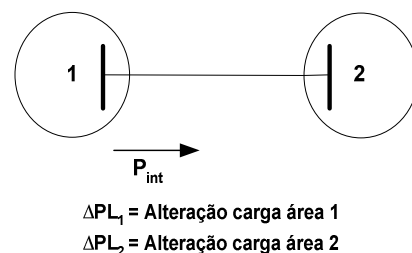


Figura 19: Ações de controlo na linha de interligação

Define-se controlo de área de um sistema interligado o local onde a produção e a carga são controlados como as regras apresentadas na tabela anterior.

As fronteiras do controlo da área são simplesmente as linhas de interligação, onde o fluxo de potência está a entrar ou a sair.

Todas as linhas que interligam áreas de diferentes SEE devem ser monitorizadas, para que o intercâmbio total entre áreas de controlo possa ser conhecido e contribuir para a estabilidade no controlo dos sistemas.

As regras aplicadas na tabela podem ser implementadas por um mecanismo de controlo que mede o desvio na frequência  $\Delta\omega$  e os desvios no valor do intercâmbio  $\Delta P_{int}$ .

A resposta da frequência e dos trânsitos de potência nas linhas de interligação resultantes de uma variação na carga  $\Delta PL_1$ , no sistema de 2 áreas da figura 15 são encontrados nas equações (15) a (16).

Estes resultados são representados da seguinte forma:

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (17)$$

$$\Delta P_{linha} = \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \quad (18)$$

Relativamente à primeira linha da tabela tem-se:

$$\Delta P_{ger1} = \Delta P_{L1}$$

$$\Delta P_{ger2} = 0$$

A alteração necessária na produção, historicamente denominada Erro de Controlo de Área (ACE), representa o desvio na produção da área necessário para restaurar a frequência e o intercâmbio nas linhas de interligação para os valores desejados.

O Erro de Controlo da Área (ACE) pode ser expresso da seguinte forma:

$$ACE = (P_1 - P_0) - 10 \cdot B_f (f_1 - f_0) \pm B_t \Delta t$$

em que:

$P_1$  Intercâmbio que efetivamente se verifica (MW)

$P_0$  Intercâmbio previsto à frequência normal (MW)

$f_1$  Frequência que efetivamente se verifica (Hz)

$f_0$  Frequência desejada (Hz)

$B_f$  “Bias” da área (MW/0,1Hz): (variação da frequência com a carga)

$B_t$  “Bias” do erro temporal da área (MW/s)

$\Delta t$  Erro temporal (s), - para devagar e + para depressa

No caso dos dois sistemas interligados que estão a ser analisados, as equações para o ACE para cada área são:

$$ACE_1 = -\Delta P_{int1} - B_1 \Delta\omega$$

$$ACE_2 = -\Delta P_{int2} - B_2 \Delta\omega$$

Onde  $B_1$  e  $B_2$  são chamados fatores de influência da frequência “Bias”. Pode-se ver a partir das equações (34) e (35) que estes valores podem obter-se da seguinte forma:

$$B_1 = \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \quad (19)$$

$$B_2 = \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)$$

Resultando:

$$ACE_1 = \left( \frac{+\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_1} + D_1 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = \Delta P_{L1}$$

$$ACE_2 = \left( \frac{-\Delta P_{L1} \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) - \left( \frac{1}{R_2} + D_2 \right) \left( \frac{-\Delta P_{L1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} \right) = 0$$

Este controlo pode ser continuado usando o esquema da figura 20. Notar que os valores  $B_1=B_2$  teriam que mudar cada vez que a unidade fosse ligada/desligada, de modo a obter os valores exatos dados pelas equações (19). Atualmente, a ação integral de controlo suplementar garante uma reposição do ACE para zero, mesmo quando  $B_1$  e  $B_2$  tomam valores incorretos.

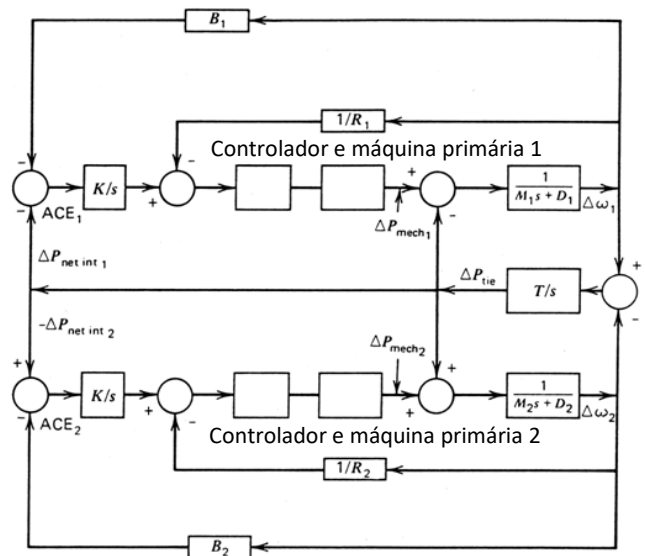


Figura 20: Controlo suplementar “Bias” na linha de interligação

### 8 Conclusão

Os sistemas elétricos de energia em corrente alternada constituem redes síncronas interligadas que funcionam com uma frequência comum que tem de ser regulada e controlada de uma forma rigorosa. Isto não será viável se não existir um método eficaz de controlo sobre os geradores, sobre a frequência e a tensão na rede e, também, sobre o transito de energia nas linhas de interligação. Este facto é tanto mais relevante quando se sabe que em corrente alternada a energia não pode ser eletricamente armazenada. Neste artigo, apresenta-se os conceitos fundamentais associados às ações de controlo dos sistemas elétricos de energia interligados. Baseia-se na modelização de todos os equipamentos constituintes aos quais se aplicam ações de controlo, com vista a garantir o equilíbrio entre a produção de energia e o consumo, as perdas nas redes de transmissão e a potência especificada para as linhas de interligação, garantindo-se assim a estabilidade da frequência e a exploração dos sistemas elétricos de uma forma segura.

### Referências:

- [01] J. Sucena de Paiva, "Redes de Energia Eléctrica – uma análise sistémica", IST Press, 2014
- [02] J. Grainger, W. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill International Editions, 1994
- [03] Rui Castro e Eduarda Pedro. "Redes e Sistemas de Energia Elétrica", IST Press, 2014
- [04] Allen J. Wood; Bruce F. Wollenberg; Gerald B. Sheblé. "Power Generation, Operation, And Control". Third Edition. John Wiley & Sons, 2014
- [05] J. Beleza Carvalho, "O Controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia", Apontamentos das aulas de Operação e Planeamento de Sistemas Eléctricos de Energia. ISEP, 2018.

## NOTAS DISPERSAS

**Massa:** Parte condutora de um equipamento elétrico suscetível de ser tocada, em regra, isolada das partes ativas mas podendo ficar em tensão em caso de defeito.

**Terra:** Massa condutora da Terra, cujo potencial elétrico é, em cada ponto, considerado, por convenção, igual a zero.

**Terra de proteção (Terra das massas):** Circuito de terra a que são ligados todos os elementos condutores da instalação normalmente sem tensão ou com tensões não perigosas, mas sujeitos a uma passagem fortuita de corrente que provoque diferenças de potencial perigosas e não previstas entre esses elementos (solo incluído). Comentário. - O presente regulamento permite que, em instalações que satisfaçam a condições especificadas, a terra de proteção possa desempenhar as funções de terra de serviço de alta ou de baixa tensão ou até de ambas, simultaneamente (terra geral). Fora de tais condições todas estas terras serão distintas.

**Terra de serviço (Terra da alimentação):** Circuito de terra a que são ligados unicamente pontos dos circuitos elétricos para influenciar as suas condições de exploração, quer limitando o potencial dos condutores em relação ao solo, quer permitindo o funcionamento das proteções

**Resistência de terra:** Resistência elétrica entre o eléctrodo de terra e a terra.





# MOTORES DE PROPULSÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS: TIPOS, CARACTERÍSTICAS E PERSPETIVAS DE EVOLUÇÃO

## Resumo

*Os sistemas de propulsão baseados em motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) e motores de indução (MI) têm sido as principais opções para veículos híbridos (VH) e elétricos (VE). As limitações das reservas e os elevados custos das terras-raras (constituente essencial dos ímanes permanentes (IP)) têm motivado o interesse por motores sem IP ou com menores quantidades de terras-raras. Várias configurações têm vindo a ser desenvolvidas e/ou aperfeiçoadas, com vista a ultrapassar as limitações dos MI, sendo que a otimização do seu projeto também tem sido alvo de atenção. De modo não exaustivo, o objetivo deste artigo é incidir sobre os tipos de motores atualmente aplicados na propulsão elétrica. No final, apresenta-se uma breve referência às principais tecnologias emergentes.*

## 1. Introdução

A dependência dos meios de transporte relativamente aos combustíveis fósseis, bem como o aumento dos impactos ambientais, tem promovido, um crescente investimento no desenvolvimento de alternativas mais eficientes e ecológicas. Atualmente, os VH (sistema de propulsão composto por um motor de combustão interna (MCI), auxiliado por motor elétrico) e os VE (sistema de propulsão composto por motor(es) elétrico(s)) são as principais alternativa aos veículos convencionais, baseados em MCI – sobretudo os primeiros [1], [2]. Os principais fabricantes de automóveis têm vindo a desenvolver um número crescente de modelos híbridos e, mais recentemente, puramente elétricos.

As características dos sistemas de propulsão dos VE dependem de múltiplos fatores, sendo de destacar as restrições impostas pela estrutura do veículo, tipos de fonte de energia (e.g., baterias, supercondensadores, células de

combustível), características dos trajetos e requisitos do condutor. Os principais aspetos a considerar no dimensionamento de um sistema de propulsão elétrica são [3]:

- Tipo de motor, características do conversor de potência e método de controlo;
- Capacidades máximas de binário e velocidade, bem como dos níveis de tensão e corrente;
- Número de motores e tipos de transmissão de potência;
- Tipos de sistemas de armazenamento de energia e características (e.g., máxima energia, máxima potência instantânea);
- Sistema de carregamento e monitorização (e.g., *Battery Management System*).

Deste modo, os desafios colocados aos motores de propulsão dos VE são muito mais exigentes do que em aplicações industriais.

Até ao momento, os motores síncronos de ímanes permanentes (MSIP) e os motores de indução (MI) têm sido as escolhas dos principais fabricantes de VH e VE, com destaque para os primeiros (Tabela 1).

Tabela 1 – Motores de propulsão em VH e VE [3]

Make	Model	Traction Motor
Honda	EV Plus	DC Motor
Holden	Ecommodore	SRM
Nissan	Tino,Leaf,Altra	PMSM
Honda	Insight,Accord,Civic	PMSM
Toyota	Prius C & V	PMSM
Toyota	Highlander,Avalon	PMSM
Toyota	Camry	PMSM
Ford	Fusion SE Hybrid	PMSM
Ford	C Max Hybrid SEL	PMSM
Hyundai	Blueon	PMSM
Chevrolet	Volt & Energi	PMSM
Renault	Kangoo	IM
Chevrolet	Silverado	IM
Daimler Chrysler	Durango	IM
Tesla	Roadster	IM
Honda	Fit EV	IM
Toyota	Reva4	IM
REVA	NXR	IM
Ford	Focus Electric	IM
Ford	Transit Connect	IM
GM	EV1	IM
BMW	X5	IM

O preço e disponibilidade dos elementos de terras-raras, que compõem os ímãs permanentes (IP) com maiores densidades de energia, têm incentivado o desenvolvimento de máquinas sem aqueles componentes ou com IP sem terras-raras (e.g., Alnico e ferrites, que são materiais mais baratos). No entanto, a sua densidade de energia é substancialmente mais baixa do que a das terras-raras, o que coloca limitações à densidade de potência e rendimentos obtidos: a otimização do projeto dos motores é determinante na mitigação destas consequências, entre outras. Por outro lado, o desenvolvimento de novos materiais, arquiteturas de conversores de potência e sistemas de controlo tem estimulado o aparecimento de novas concepções de motores mais compactos (i.e., maiores densidades de potência e binário), com melhores rendimentos, mais robustas e tolerantes a falhas [3], [4].

Este artigo pretende incidir sobre as características gerais de diferentes tipos de motores para VE. Começa-se por abordar os MI e MSIP, seguindo-se outros motores com potencial para aplicações em VE e que se encontram em fases distintas de desenvolvimento. As características dos respetivos conversores e sistemas de controlo não serão aqui abordadas.

A estrutura do artigo é a seguinte: A secção 2 refere-se às características dos sistemas de propulsão dos VE, focando as exigências impostas aos motores.

Na secção 3 são apresentadas as características, vantagens e desvantagens dos motores que integram os VH e VE comercializados atualmente, bem como de outros tipos de motores em fase avançada de desenvolvimento.

A secção 4 faz uma breve referência às tecnologias emergentes que têm vindo a captar maior atenção.

Finalmente, na secção 5 são apresentadas algumas conclusões.

## 2. Características de Desempenho dos VE

Os sistemas de propulsão dos VE caracterizam-se por disponibilizarem elevados binários na zona das baixas velocidades, com uma zona ampla de altas velocidades (funcionamento com potência constante).

A Figura 1 ilustra as características de um sistema de propulsão concreto.

Entre outros aspetos, os ciclos de condução e desempenhos pretendidos são fundamentais no dimensionamento e desempenho dos sistemas de propulsão: do binário máximo disponível (modo contínuo) dependerá o desempenho do veículo em subidas; em trajetos planos, a velocidade máxima atingida (modo contínuo) é determinada pela potência fixada para a gama de altas velocidades.

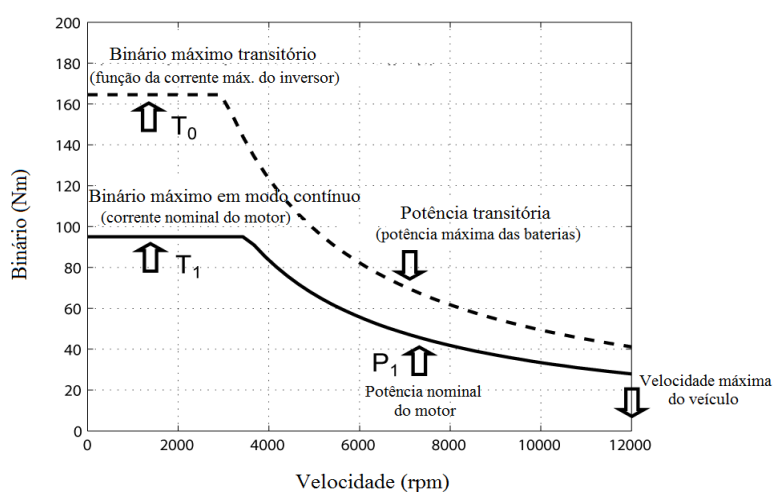


Figura 1 – Características dos sistemas de propulsão elétrica

A capacidade de funcionamento em sobrecarga dos motores elétricos (característica a tracejado da Figura 1) é uma mais-valia muito relevante sobre os MCI [5]. Com efeito, há a considerar um acréscimo do binário e potência máximos desenvolvidos, ainda que por períodos limitados (tanto menores quanto maior a sobrecarga): Surgem vantagens tanto em modo motor (possibilidade de desenvolver elevados binários em toda a gama de velocidades  $\Rightarrow$  maiores acelerações, bem como picos de velocidade), como em modo frenagem (aumento da capacidade de frenagem com recuperação de energia).

É de realçar a extrema importância das características do inversor do motor, bem como das baterias do sistema de propulsão. Em termos práticos, o acréscimo do binário máximo está limitado pela corrente nominal do inversor; por outro lado, no aumento da potência máxima devem estar presentes as limitações próprias das fontes de energia do veículo [5].

As características da Figura 1 são fundamentais para o dimensionamento dos motores que integram os sistemas de propulsão dos VE [6]. De referir ainda que o valor da tensão na entrada do inversor e a sua regulação têm um impacto direto na extensão da zona das altas velocidades.

Em síntese, as principais características dos motores que integram os VE são [3], [6]:

- Elevadas densidades de potência e binário;

- Rendimentos elevados em todas a gamas de binário e velocidade;
- Ampla zona de funcionamento com potência constante;
- Binário de arranque elevado;
- Sistemas de controlo flexível;
- Elevada robustez e tolerância a falhas;
- Elevada capacidade de sobrecarga (os intervalos entre sobrecargas consecutivas podem ser curtos);
- Elevadas respostas dinâmicas;
- Limitação das componentes oscilatórias do binário, bem como dos níveis de ruído;
- Custo moderado.

É de realçar que estas características não dependem apenas do motor, mas também da sua integração com o conversor de potência e sistema de controlo que compõem a drive de propulsão.

Este aspeto é fundamental na eficácia dos sistemas de propulsão elétrica (dispositivos de armazenamento de energia, drive, transmissão mecânica e sistemas de controlo), o que coloca desafios muito exigentes à sua conceção.

### 3. Motores Elétricos para Propulsão

Na Figura 2 são indicados os tipos de motores elétricos com maior potencial para a propulsão elétrica, incluindo algumas configurações emergentes [7].

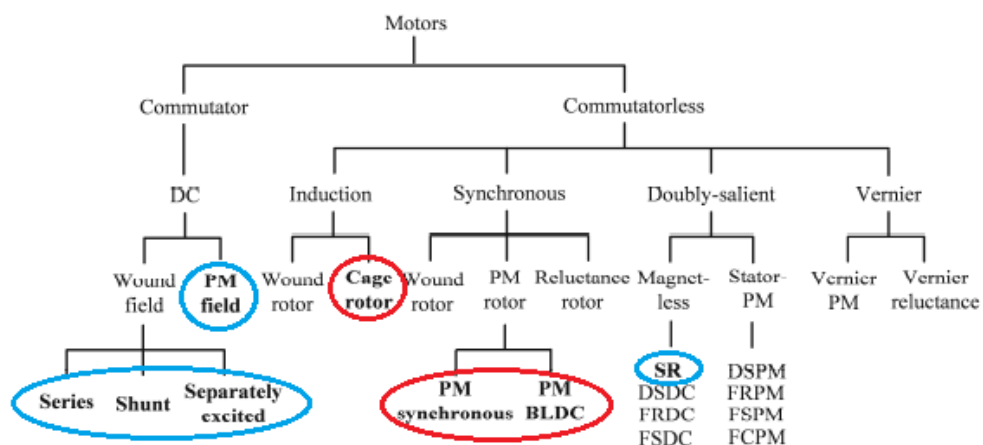


Figura 2 – Tipos de motores elétricos para propulsão

É evidente a eliminação dos comutadores mecânicos, anéis e escovas.

Os motores atualmente mais usados estão assinalados a vermelho e a azul as máquinas aplicadas residualmente. Os restantes são conceções em fase de desenvolvimento. Com exceção do motor síncrono de relutância, estes últimos são sumariamente referidos neste artigo.

### 3.1. Motor de Corrente Contínua (DC)

Historicamente, o início da tração elétrica esteve intimamente associado ao motor série DC. As principais razões prendem-se com a característica mecânica naturalmente adaptada às exigências dos sistemas de tração, bem como a simplicidade dos sistemas de controlo e sua implementação (controlo independente do campo magnético e do binário). São também de referir a utilização de outras variantes clássicas de motores DC: excitação independente e “shunt”. No entanto, os motores de corrente contínua convencionais apresentam rendimentos relativamente baixos e baixas densidades de potência, para além de exigirem elevados níveis de manutenção (fiabilidade reduzida). Para tal, muito contribui a existência do sistema coletor/escovas, o qual impõe também limites na velocidade.

Em certos casos, são usados motores DC de ímanes permanentes (o enrolamento de excitação é substituído por ímanes permanentes). Embora apresentem melhores rendimentos, não eliminam os inconvenientes do comutador mecânico (coletor/escovas). Os motores DC continuam a ser uma opção em aplicações que requerem potências baixas. Aliada às excelentes respostas dinâmicas destas máquinas, os conversores de potência tendem a ser mais simples, com menores custos [8].

### 3.2. Motor de Indução Trifásico

São muito utilizados, atendendo à sua simplicidade construtiva e robustez, principalmente a variante em gaiola de esquilo (Figura 3).

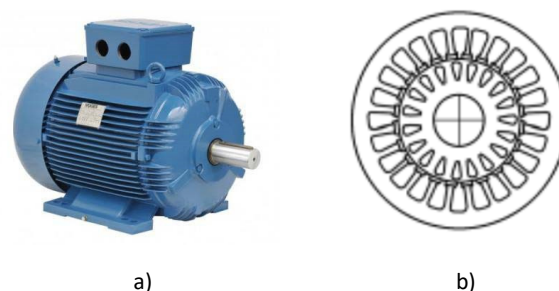


Figura 3 – MI: a) aspeto geral; b) corte seccional

Tipicamente, a zona de funcionamento com potência constante corresponde a 4-5 vezes a velocidade nominal, o que é vantajoso no contexto dos VE [3]. Por outro lado, os rendimentos mais elevados estão associados a esta zona: nesta máquina, as perdas por efeito de Joule são as dominantes, pelo que a menor corrente de magnetização (zona de enfraquecimento de campo) contribui para a sua diminuição. O funcionamento com deslizamentos baixos em toda a gama de velocidades é fundamental, uma vez que as perdas por efeito de Joule no rotor dependem desse valor.

As principais desvantagens do MI são os baixos fator de potência e densidade de potência (em comparação com o MSIP); nas baixas velocidades, os rendimentos vêm diminuídos, sobretudo para cargas reduzidas. A dificuldade em dissipar as perdas no rotor limita a capacidade de sobrecarga do MI. Os sistemas de ventilação forçada mitigam este efeito, mas aumentam o volume e complexidade da máquina.

A tecnologia associada aos MI apresenta um nível de maturidade muito elevado, o que não significa que esteja esgotado o espaço para novos desenvolvimentos [6]. Fundamentalmente, a aplicação de novos materiais e melhorias no projeto, bem como a implementação de métodos de otimização das perdas, apresentam um potencial considerável de desenvolvimento [9].

Os sistemas baseados no controlo vetorial – controlo por orientação de campo – permitem dotar o MI de excelentes desempenhos dinâmicos, possibilitando o funcionamento nas duas zonas indicadas na Figura 1.

### 3.3. Motor Síncron de Ímanes Permanentes

De modo distinto do MI (motor assíncrono), nestas máquinas a velocidade do rotor é igual à velocidade de sincronismo do campo girante Estatório (regime permanente). No rotor são colocados IP baseados em terras-raras (i.e., ligas compostas por neodímio (Nd), ferro (Fe) e boro (B)). Sendo ímanes com elevadas densidades de energia, obtêm-se máquinas mais compactas do que os MI, com melhores rendimentos e fator de potência. A ausência de enrolamentos rotóricos permite a eliminação (quase total) das perdas por efeito de Joule no rotor, o que contribui para os elevados rendimentos destas máquinas. Por outro lado, a refrigeração torna-se mais simples, uma vez que as perdas ocorrem sobretudo no estator. Atendendo às características dos ímanes, as perdas no ferro do estator podem atingir valores consideráveis [10]. Existem duas configurações distintas, tal como indicado na Figura 4:

- Ímanes montados na superfície do rotor (SR);
- Ímanes colocados no interior do rotor (IR).

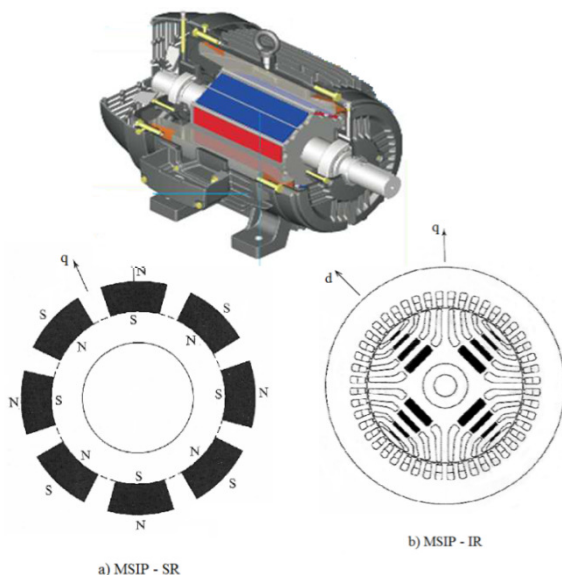


Figura 4 – MSIP: exemplo de aspeto geral; variantes rotóricas: SR (a) e IR (b)

Em termos construtivos, há a salientar a maior vulnerabilidade às forças centrífugas dos ímanes na variante SR (particularmente crítico nas altas velocidades). No caso IR, é necessária a inclusão de barreiras de fluxo (Figura 4-b)), o

que introduz uma maior complexidade e custo no seu fabrico [10]. As consequências mais importantes das diferenças entre estas duas variantes são:

- O circuito magnético IR apresenta características anisotrópicas (i.e.,  $L_d \neq L_q$ )<sup>(1)</sup> – anisotropia inversa ( $L_d < L_q$ ) –, pois a permeabilidade magnética dos ímanes é aproximadamente igual à do ar;
- O binário desenvolvido na configuração IR tem duas componentes: uma resultante da interação do campo magnético fixo com o campo de reação do induzido; uma segunda componente devida ao binário de anisotropia. O binário resultante é mais elevado, pelo que esta configuração é mais utilizada em VH e VE.

O rendimento é elevado na gama das baixas velocidades. Para o motor atingir velocidades superiores à nominal é necessário que  $i_d$  (componente longitudinal da corrente do estator)<sup>(2)</sup>, alinhada com a direção do campo magnético indutor (IP), crie um campo magnético de reação que se oponha a este (zona de enfraquecimento de campo). Assim, quanto maior for a velocidade pretendida, maior será o valor de  $i_d$ ; as perdas por efeito de Joule aumentam, o que leva à diminuição do rendimento. Importa ter presente que elevados valores de  $i_d$  podem ter um duplo efeito na desmagnetização dos ímanes, quer pela ação do campo criado, quer também pelo aumento da temperatura devido ao acréscimo das perdas Joule. Com efeito, as propriedades das terras-raras deterioram-se com temperaturas elevadas. Deste modo, a limitação do rendimento e o risco de desmagnetização dos IP limitam o funcionamento nas altas velocidades [11]. Em caso de falha na alimentação podem surgir sobretensões aos terminais da máquina; o seu valor depende da velocidade, pelo que na gama das altas velocidades a possibilidade de ocorrência destas falhas representa um sério risco para os ocupantes do veículo, bem como para os respetivos equipamentos [12]. Para além do maior custo, estas são as principais desvantagens dos motores com IPs.

<sup>(1)</sup>  $L_d$  e  $L_q$  são, respetivamente, os coeficientes de auto-indução longitudinal e transversal de um enrolamento de fase do estator.

<sup>(2)</sup> De modo complementar,  $i_q$  é a componente transversal da corrente do estator associada ao binário desenvolvido.



De modo semelhante aos MIs, as estratégias de controlo vetorial são normalmente aplicadas aos MSIPs, com base nos objetivos pretendidos (e.g., maximização do binário, rendimento, fator de potência, etc).

### 3.4. Motor “Brushless” DC

Do ponto de vista construtivo, os motores “brushless” DC (MBDC) têm uma estrutura semelhante aos motores DC convencionais, sem o enrolamento da armadura (rotor) e o sistema coletor/escovas. Os enrolamentos do estator são do tipo concentrado, alimentados por uma fonte exterior. No rotor são colocados ímanes permanentes, à semelhança dos motores anteriores (Figura 5).

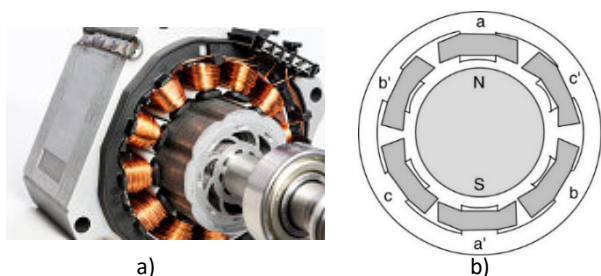


Figura 5 – MBDC: a) aspeto geral; b) corte seccional

Há dois aspetos essenciais a referir [10]:

- O coletor/escovas é substituído por um sistema de comutação eletrónica: as correntes no estator são comutadas em função da posição do campo magnético rotórico. Normalmente, são utilizados sensores de efeito de Hall para este fim;
- Atendendo à configuração deste tipo de motores, a distribuição espacial do campo magnético do rotor no entreferro é, em cada instante, do tipo retangular (mais precisamente, trapezoidal).

As correntes nos enrolamentos estatóricos têm uma evolução temporal do tipo trapezoidal. Em comparação com distribuições de campos magnéticos e correntes sinusoidais, com os mesmos valores de pico (motores anteriores), os binários desenvolvidos são consideravelmente mais elevados, atendendo aos maiores valores eficazes; no entanto, a componente alternada é maior.

Para além das vantagens comuns aos MSIPs – robustez, fiabilidade – há a salientar densidades de potência e rendimentos superiores [3]. As características referidas das correntes estatóricas, bem como a comutação eletrónica, implicam a inclusão de conversores de potência e sistemas de controlo dedicados. Estes últimos são bastante mais simples do que no caso dos MSIP [12]. Quanto às desvantagens, as mais relevantes são semelhantes às descritas na secção anterior.

### 3.5. Motor Síncrono de Relutância

Os motores síncronos de relutância (MSrel) procuram combinar as vantagens dos MSIP e MI: são máquinas robustas e sem IP, com rendimentos elevados, atendendo à (quase) ausência de perdas no rotor. O seu maior inconveniente é o baixo fator de potência [13].

O estator é semelhante ao das máquinas AC polifásicas convencionais: ranhurado na periferia interior, com enrolamentos de fase distribuídos, de modo sinusoidal, pelas ranhuras. Normalmente, no rotor são colocadas barreiras de fluxo axiais (visíveis na Figura 6), que lhe conferem características anisotrópicas, isto é, propriedades magnéticas distintas segundo as direções radiais (d e q)<sup>(3)</sup>.

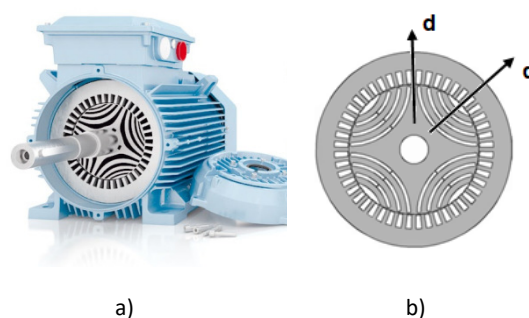


Figura 6 – MSrel: a) aspeto geral; b) corte seccional

Podem ser alimentados com tensões sinusoidais, simétricas e equilibradas. No entanto, é frequente serem alimentados através de um conversor de potência, de modo a regular a velocidade e otimizar a sua exploração.

<sup>(3)</sup> Ao contrário do MSIP, tem-se  $L_d > L_q$

O baixo fator de potência implica valores relativamente elevados de potência reativa, associados ao funcionamento destas máquinas, tendo um impacto direto no tamanho do conversor de potência. O fator de potência pode ser melhorado aumentando a razão  $L_d/L_q$ ; a forma, o posicionamento e número das barreiras de fluxo têm aqui um impacto determinante.

Com vista ao aumento do fator de potência e do rendimento, tem sido explorada a adição de IP no rotor (Figura 7).

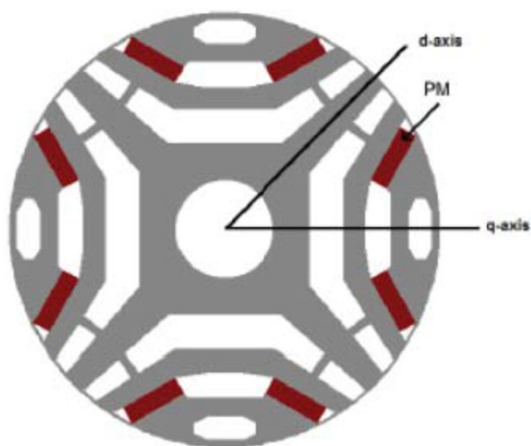


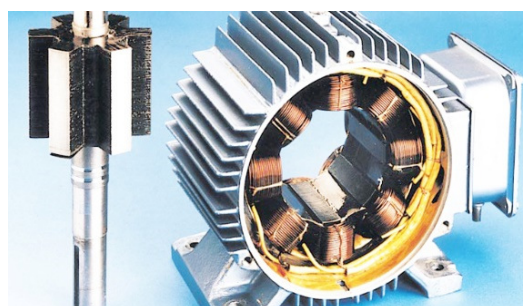
Figura 7 – Corte seccional de rotor de MSrel com IP [13]

De notar que as quantidades de IP são muito menores, pelo que o fluxo magnético é bastante menor do que nos MSIP. Em consequência, os problemas associados à desmagnetização dos IP e funcionamento a altas velocidades são atenuados. Torna-se também viável a opção por materiais magnéticos sem terras-raras, como foi já referido. Para além da robustez, são máquinas com boa tolerância a falhas. Quanto aos sistemas de controlo, são muito semelhantes aos dos MSIP.

### 3.6. Motor de Relutância Comutado

A sua estrutura é equivalente à dos motores de passo de relutância variável, necessitando de um conversor e controlador dedicados.

O motor de relutância comutado (MRC) é uma máquina com dupla configuração polar (i.e., os circuitos magnéticos do estator e do rotor têm pólos salientes – normalmente, o nº de pólos do estator é maior do que o nº de pólos do rotor). Os circuitos magnéticos do estator e do rotor são formados por empilhamentos de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si. Os enrolamentos das fases do estator são do tipo concentrado, colocados em torno dos respectivos núcleos polares. No rotor não existem enrolamentos nem ímanes permanentes [14]. A Figura 8 ilustra alguns pormenores do estator e rotor de uma configuração real (a) e o respetivo corte seccional (b).



a)



b)

Figura 8– MRC [4 fases - 6 pólos no estator e 4 no rotor (6/4)]: a) aspeto geral; b) corte seccional

As fases do estator são alimentadas com impulsos de corrente, em função da posição do rotor, pelo que é fundamental conhecer-se a sua posição instantânea. Apresentam uma construção simples, robusta e fiável, à semelhança dos MI. Têm boa tolerância a falhas, que aumenta com o nº de fases. São máquinas anisotrópicas, cujo princípio de funcionamento assenta no desenvolvimento de binários de relutância. Apresentam excelentes características para a tração – binários muito elevados nas baixas velocidades e zona de funcionamento com potência constante caracterizada por intervalos alargados de velocidades.

Os sistemas de controlo são bastante complexos, atendendo aos níveis de saturação que ocorrem no circuito magnético, particularmente, nas extremidades dos pólos do estator. O binário desenvolvido não é constante; existe uma componente alternada (ripple), principalmente nas velocidades baixas, que tende a diminuir com o número de fases do motor. Uma outra desvantagem é o ruído acústico. Aqui, as componentes mecânicas do motor têm também um papel importante na sua diminuição [14].

#### 4. Configurações Emergentes de Motores para VE

Com vista ao aumento das densidades de potência e binário, bem como rendimentos e robustez elevados, diversas configurações de máquinas têm vindo a ser desenvolvidas, sendo de destacar as seguintes [15] (ver Figura 2):

##### i. Motores com polos salientes no estator e rotor

- Com IP (normalmente no estator):
  - *Doubly-salient PM* (DSPM);
  - *Flux reversal PM* (FRPM);
  - *Flux switching PM* (FSPM);
  - *Flux-controllable PM* (FCPM) – inclui um enrolamento no estator, alimentado em DC, o que permite regular o fluxo magnético.
- Sem IP (substituídos por enrolamentos DC):
  - *Switched Reluctance Motor* (SR) – Motor de Relutância Comutado;
  - *Doubly-salient DC* (DSDC) – neste caso, o estator possui dois enrolamentos (AC e DC);
  - *Flux reversal DC* (FRDC);
  - *Flux switching DC* (FSDC).

##### ii. Motores Vernier:

O seu funcionamento assenta no efeito Vernier, com vista ao aumento do binário nas baixas velocidades, permitindo obter densidades de binário superiores à generalidade dos motores com IP.

Finalmente, importa referir que as configurações referidas podem ser aplicadas a máquinas de fluxo radial (convencional), fluxo axial ou fluxo transversal, influenciando as densidades de potência obtidas.

#### 5. Conclusões

A propulsão elétrica coloca níveis de exigência aos motores (elétricas, térmicas, mecânicas, ambientais, ...) muito acima das aplicações industriais. São de destacar elevadas densidades de potência e binário, zona ampla de funcionamento com potência constante, rendimentos elevados, robustez e tolerância a falhas, etc. A otimização do projeto das máquinas (elétrico, magnético e térmico), combinada com a arquitetura do conversor, métodos de controlo e tecnologias de fabrico, são determinantes para a melhoria contínua do desempenho das drives dos sistemas de propulsão elétrica.

Os MSIPs e os MIs têm sido as escolhas preferenciais, principalmente os primeiros. As elevadas densidades de potência e binário, com altos rendimentos, são as principais justificações. No entanto, o custo e disponibilidade dos elementos de terras-raras tem incentivado o interesse e desenvolvimento de motores elétricos sem IPs ou que não possuam terras raras.

Pela sua maturidade, o MI tem sido a principal alternativa comercial. Atendendo às suas limitações, o potencial de outras configurações (algumas recentes, outras nem tanto) está a ser explorado. São de destacar o motor síncrono de relutância, os motores com polos salientes no estator e rotor (e.g, MRC) e os motores Vernier.

Em termos gerais, este artigo procurou incidir, de modo não exaustivo, sobre os tipos de motores atualmente aplicados na propulsão elétrica (ou próximos disso), com uma breve referência às tecnologias emergentes mais promissoras.

## Bibliografia

- [1] D. Bucherl, R. Nuscheler, W. Meyer, and H.-G. Herzog, "Comparison of electrical machine types in hybrid drive trains: Induction machine vs. permanent magnet synchronous machine," in 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008, pp. 1-6: IEEE.
- [2] P. Miller, "xEV market trend and prospect," in 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2012, pp. 1095-1099: IEEE.
- [3] S. J. Rind, Y. Ren, Y. Hu, J. Wang, and L. Jiang, "Configurations and control of traction motors for electric vehicles: A review," Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 3, no. 3, pp. 1-17, 2017.
- [4] R. Poole, "Rare earth metals in short supply?," IET E&T, vol. 7, no. 4, 2012.
- [5] A. Vagati, G. Pellegrino, and P. Guglielmi, "Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application," in The XIX International Conference on Electrical Machines-ICEM 2010, 2010, pp. 1-6: IEEE.
- [6] Y. A. Alamoudi, A. Ferrah, R. Panduranga, A. Althobaiti, and F. Mulolani, "State-of-the Art Electrical Machines for Modern Electric Vehicles," in 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), 2019, pp. 1-8: IEEE.
- [7] K.-T. Chau, C. Jiang, W. Han, and C. H. Lee, "State-of-the-art electromagnetics research in electric and hybrid vehicles," Progress in electromagnetics research, vol. 159, pp. 139-157, 2017.
- [8] P. Bhatt, H. Mehar, and M. Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle—A Comparative Study," Available at SSRN 3364887, 2019.
- [9] A. M. Bazzi and P. T. Krein, "Comparative evaluation of machines for electric and hybrid vehicles based on dynamic operation and loss minimization," in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 3345-3351: IEEE.
- [10] P. M. A. d. S. Melo, "Veículos eléctricos. Características e tipos de motores," Neutro à Terra, pp. 13-22, 2009.
- [11] F. Un-Noor, S. Padmanaban, L. Mihet-Popa, M. N. Mollah, and E. Hossain, "A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development," Energies, vol. 10, no. 8, p. 1217, 2017.
- [12] G. Pellegrino, A. Vagati, B. Boazzo, and P. Guglielmi, "Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, no. 6, pp. 2322-2332, 2012.
- [13] K. Rajashekara, "Present status and future trends in electric vehicle propulsion technologies," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 3-10, 2013.
- [14] P. Sousa Melo, "Características Básicas do Motor de Relutância Comutado," Neutro à Terra, 2018.
- [15] I. Boldea and L. Tutelea, Reluctance Electric Machines: Design and Control. CRC Press, 2018.

## HUMOR ELETRO



**Título:** Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Aparelhagem de Proteção, Comando e Seccionamento  
**Autor:** António Augusto Araújo Gomes, Sérgio Filipe Carvalho Ramos, André Fernando Ribeiro de Sá  
**Editora:** Publindústria  
**Data de Edição:** Engebook  
**ISBN:** 9789898927187  
**Nº Páginas:** 226  
**Encadernação:** Capa mole

**Sinopse:**

A obra Instalações Elétricas de Baixa Tensão - Aparelhagem de Proteção, Comando e Seccionamento pretende ser, acima de tudo, uma ferramenta didática de apoio aos alunos de cursos de Engenharia Eletrotécnica, bem como a Técnicos Responsáveis pelo projeto, execução e exploração de instalações elétricas. Pretende ser, ainda, uma ferramenta prática de estudo e de trabalho, capaz de transmitir conhecimentos técnicos, tecnológicos, normativos e regulamentares sobre a aparelhagem de proteção, comando e seccionamento de baixa tensão, aos diversos agentes eletrotécnicos, tornando-os capazes de, para cada instalação na qual sejam intervenientes, maximizar a segurança, a fiabilidade e a funcionalidade, assim como reduzir os custos de execução e exploração das instalações.



# INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO

## APARELHAGEM DE PROTEÇÃO, COMANDO E SECCIONAMENTO

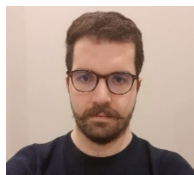
ENGEBOOK **ELETROTECNIA**

António Gomes  
Sérgio Ramos  
André Sá





## **COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:**



**André Tiago Alves Sousa**

**1180363@isep.ipp.pt**

Licenciado em Engenharia Eletromecânica pelo Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Aluno do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto.



**Bruno Miguel da Rocha Canizes**

**brmrc@isep.ipp.pt**

GECAD – Politécnico do Porto

**Edison A. C. Aranha Neto**

**earanha@ifsc.edu.br**

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil



**Henrique Fragoso Martins**

**1121211@isep.ipp.pt**

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica, área científica de Sistemas de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia. Estudante do curso de mestrado em Engenharia Eletrotécnica, área científica de Sistemas de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Áreas de interesse: Sistemas de Armazenamento de Energia, Produção de Energia, Fontes de Energia Renovável, Eletrónica de Potência e Eficiência Energética.



**João Gualter Machado Rigor**

**1151326@isep.ipp.pt**

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia, pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) em 2018. Recebeu um diploma de mérito como parte integrante do Quadro de Honra do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE). Atualmente, é estudante finalista do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no ISEP.



**João André Pinto Soares**

**jan@isep.ipp.pt**

GECAD – Politécnico do Porto, Porto, Portugal

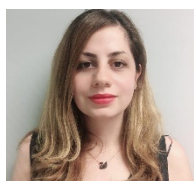
**COLABORARAM NESTA EDIÇÃO:****José António Beleza Carvalho****jbc@isep.ipp.pt**

Nasceu no Porto em 1959. Obteve o grau de B.Sc em engenharia eletrotécnica no Instituto Superior de Engenharia do Porto, em 1986, e o grau de M.Sc e Ph.D. em engenharia eletrotécnica na especialidade de sistemas de energia na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em 1993 e 1999, respetivamente.

Atualmente, é Professor Coordenador no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, desempenhando as funções de Diretor do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia.

**Lucas B. G. Gomes****1180452@isep.ipp.pt**

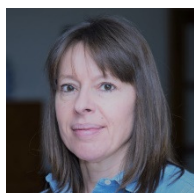
Mestre em Engenharia Eletrotécnica - Sistemas Elétricos de Energia no ISEP ao abrigo do Protocolo de Dupla Titulação entre o ISEP e Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

**Mahsa Khorram Ghahfarrokhi**

Received the B.Sc. degree in electrical engineering from the Azad university of Najaf Abad, Iran, 2013. She is currently studying toward the M.Sc. degree in power system in the IPP-ISEP, Porto, Portugal. She is a Researcher with GECAD — Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development, Polytechnic Institute of Porto, Portugal. Her research interests include energy management in buildings, energy efficiency, and demand response programs.

**Pedro Miguel Azevedo de Sousa Melo****pma@isep.ipp.pt**

Mestre em Automação, Instrumentação e Controlo pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Aluno do Programa Doutoral em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Docente do Instituto Superior de Engenharia do Porto desde 2001. Desenvolveu atividade de projetista de instalações elétricas de BT na DHV-TECNOPOR.

**Teresa Alexandra Nogueira****tan@isep.ipp.pt**

Fez a Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, área científica de Sistemas de Energia, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Fez o Doutoramento em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. É docente no Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto e investigadora no CIETI - Centro de Inovação em Engenharia e Tecnologia Industrial. Áreas de interesse: Projeto de transformadores, mercados de energia, operação do sistema de gás natural, energias renováveis, sustentabilidade, qualidade de energia, produção de energia e eficiência energética.

